

国際シンポジウム第2日目 講演1

宇宙からの地球環境モニタリング

高木 幹雄*

1. はじめに

最近、地球環境問題が大きく取り上げられ、熱帯林の乱伐、土壌浸食、砂漠化、大気中の炭酸ガスの増加による温室効果、酸性雨、オゾンホール、エルニーニョ現象による異常気象等々、新聞紙上を賑わしている。宇宙からのリモートセンシングは、地球上の現象をパターン情報として捉えるために、地球環境の研究に大きく貢献して来た。例えば、NIMBUS-7衛星によるオゾンホールの観測、NOAA衛星によるエルニーニョ現象の観測等、画像情報として観測し、単なる点の観測結果ではなく、現象が一目瞭然として示されるインパクトは大きい。

人間活動は、大気、土壌、水、海洋が複雑に関連し合う地球システムに重大な影響を及ぼしている。グローバルな視点から地球環境を科学的に観察し、理解し、更に、予測する地球システム科学においては、長期にわたる地球のグローバルな継続的観測、グローバルな地球環境に関する情報システムの確立、地球の諸現象を予測する数値モデルの開発が不可欠である。

長期にわたる地球のグローバルな継続的観測の面で、人工衛星を用いた宇宙からのリモートセンシングは、1960年に打上げられた気象衛星TIROS、72年に打上げられた地球資源技術衛星ERTS（現在のLANDSAT）以来、地球環境に関して貴重な情報を提供してきたが、2000年代には、“Mission to Planet Earth” の名の下に一段とグローバルな地球環境の観測が計画されている。

ここでは、衛星による地球環境のモニタリングについてその特徴を紹介し、代表的な地球環境観測衛星について述べる。又、2000年代前半の地球環境モニタリングにおいて重要な役割を演ずると思われるTerra及びAqua衛星について紹介する。

2. 衛星による地球環境のモニタリング

地球システムを理解する上で、宇宙からの衛星によるリモートセンシングが有効であることは言うまでもない。既に、静止気象衛星であるひまわり（GMS）、GOES、METEOSAT、極軌道衛星としては、NOAA、LANDSAT、SPOT、SEASAT、NIMBUS-7、J-ERS1、E-ERS1/2、SeaStar、RADARSAT、ADEOS等、多くの衛星によるリモートセンシングが地球環境に関して貴重な情報を与えて来た。

衛星によるリモートセンシングは、衛星に搭載されたセンサーにより地球環境をモニタリングする。図1に可視、近赤外、熱赤外領域のリモートセンシングの模式図を示すが、可視、近赤外の領域では、太陽光の反射を観測するが、地上の対象物により特有の反射特性の違いを使って認識を行うために、カラー写真の様に赤、緑、青の光の3原色に分けて眺めるのではなく、対象物特有の反射特性を検出しやすい複数の帯域（Multi-spectrum）を用いて観測する。熱赤外領域では、熱輻射を観測するが、この場合にも水蒸気や雲の影響を見るために、特に気象用では、複数の帯

* 東京理科大学基礎工学部

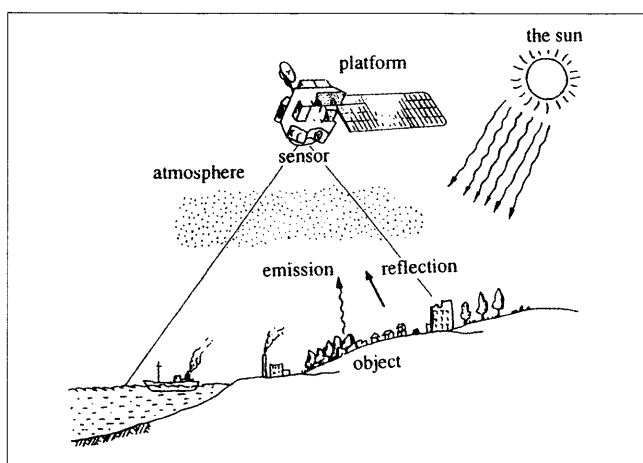


図1 可視、近赤外、熱赤外領域のリモートセンシングの模式図

域で観測する場合が多い。しかし、衛星と地球の間には、大気があり、雲、水蒸気、エアロゾル等の影響を受けるので、大気効果の補正には多くの努力が払われている。

電磁波の領域で、主に使用される領域は、図2に示している様に大気の減衰が少ない、所謂、大気の窓領域である可視、近赤外、熱赤外領域とマイクロ波の領域である。可視、近赤外の領域では太陽光の反射を、熱赤外領域では熱放射を検出する。

マイクロ波の領域では、マイクロ波放射計の様な受動的な方式とSAR

(Synthetic Aperture Radar: 合成開口レーダ) やマイクロ波散乱計の様な能動方式が用いられる。

衛星によるリモートセンシングは、次のような利点を有している。

(1) グローバルな観測が可能である。

衛星の地上の分解能と走査幅によるが、“ひまわり”の様な静止気象衛星の場合には、全球画像が得られる。極軌道型の気象衛星NOAAでは、直下点で約1kmの分解能で約3,000kmの幅が観測される。地上観測用のLANDSAT, SPOTなどでは、走査幅を狭くする代わりに分解能を上げて10m乃至数10mで観測する。又、IKONOS衛星の様に、局地的に1m以下の分解能で観測するものも現れて来ている。地上の観測では点の観測となるが、衛星を用いることにより広範囲を目的に合せた分解能で、面的なパターン情報として観測できることが、衛星によるリモートセンシングの大きな特徴である。

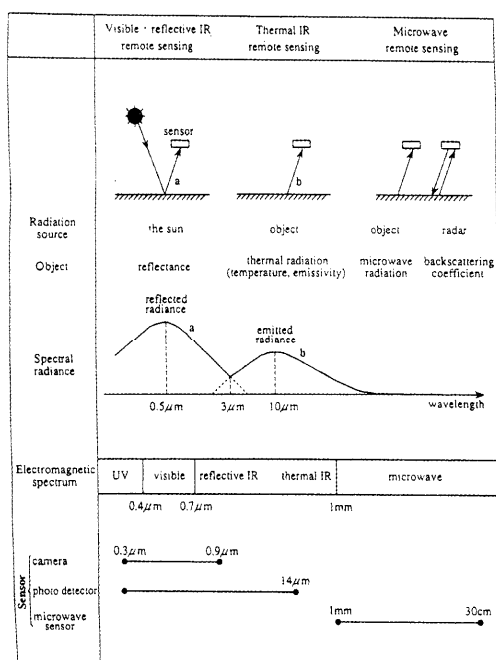


図2 リモートセンシングに用いられる電磁波の領域

(2) 周期的に継続して観測が可能である。

観測する対象によって必要となる観測周期は異なるが、気象の様に変化の激しいものを対象とする静止気象衛星では、通常は1時間毎であるが、30分毎、15分毎の観測も可能である。極軌道衛星では、分解能は粗いが広い範囲を観測する海洋向きのNOAA衛星では、2個の衛星により6時間おきに観測する。しかし、LANDSATやSPOTのような土地利用の調査を目的としたものでは、観測対象が急変することではなく、高分解能が要求されるので、走査幅を狭くして、10m乃至数10mで同一地点を十数日おきに観測する。

(3) 均質で再現性を有するデータが得られる。

衛星に搭載されているセンサの較正を機上で行い、そのデータも送られて来る場合には、均質で再現性を有するデータが得られる。機上で較正を行わない場合にも、地上の既知の物体によって較正を行う。又、高いデータ転送速度が可能となって来ているために、最近の衛星では、伝送上の誤り訂正機能を付加し、データの信頼性を向上させる傾向にある。

可視や赤外のセンサでは、大気の影響を受けるので、大気効果補正が重要である。

(4) 現地観測を同時に行えば観測データを較正し、広い範囲に適応することが可能である。

信頼性のあるデータ解析を行うためには、現地調査 (ground truth) も不可欠である。現地調査を行い、観測された物理量と対応させて検証を行うことにより、衛星による観測の精度を検証し、そのデータに基づいて推測することにより広範囲の信頼性のあるデータが得られる。

(5) 色々なセンサが搭載されており、同時に同一地点を異なったセンサで観測出来る。

可視、近赤外、熱赤外などの光学的センサ、受動的なマイクロ波放射計、能動的な合成開口レーダ、マイクロ波散乱計、マイクロ波高度計等々が搭載されており、大気、海洋、植生、雪氷等々の目的に応じて用いられる。又、種々の衛星の異なったセンサによって観測されたデータを統合して用いる data fusion も今後の重要な課題である。

3. 地球環境観測衛星

宇宙からのリモートセンシングは、2000年代には一段とグローバルな地球環境の観測が進められる計画であるが、現在迄に大きなインパクトを与えた幾つかの衛星の例を紹介する。

(1) 静止気象衛星 (GOES, GMS, METEOSAT)

“ひまわり”でお馴染みの静止気象衛星は長い歴史があり、1966年にATS-1 (Applications Test Satellite) が打ち上げられ、1974年にSMS-1 (Synchronous Meteorological Satellite) より定常的な観測が行われている。“ひまわり” (GMS: Geostationary Meteorological Satellite) の1号機は1977年に打ち上げられ、現在、GMS-5が運用されている。後継機のMTSATは、昨年、打ち上げに失敗し、当面は、GMS-5が継続して運用される。

静止気象衛星には、雲の検出と雲頂温度の測定用に可視、熱赤外のセンサが搭載されている。5個の静止気象衛星を用いて全地球の同時観測を行い、天気予報のための不可欠な手段となっている。気象のみならず、熱赤外チャネルを用いて、海面温度パターンの観測も行われている。

“ひまわり”には、可視、赤外 (水蒸気チャネル、2チャネルの熱赤外チャネル) センサが搭載されており、表面温度を観測する熱赤外面像を、温度が低い方を白に、高い方を黒に表示して、図3の如く、温度が低い雲が白く雲らしく表示される様にしてしている。

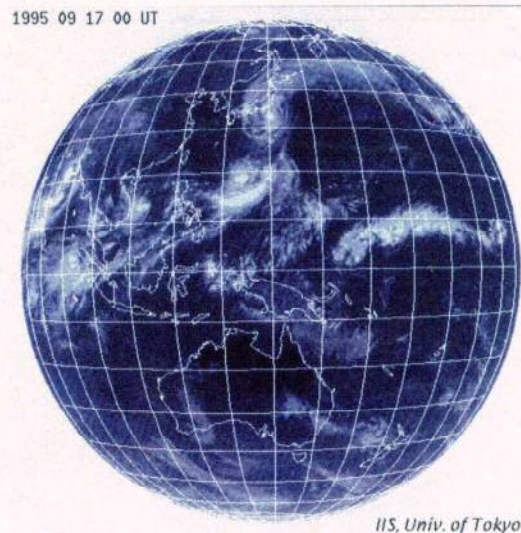


図3 ひまわり画像

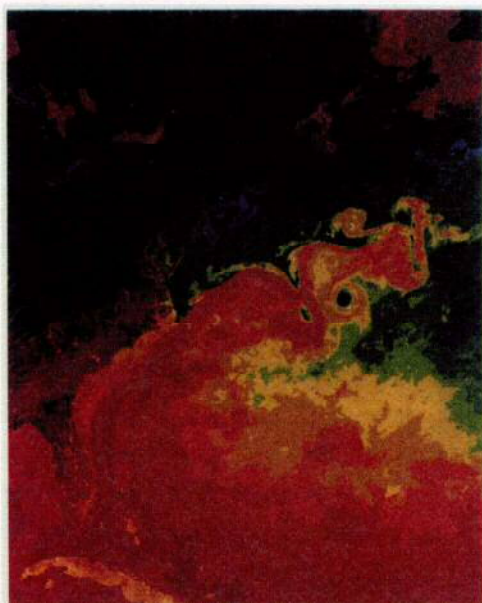


Figure 4. Image of the surface temperature of the western Atlantic Ocean compiled from data from the NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer on the polar-orbiting NOAA weather satellite. The Gulf Stream appears red (warm) at Florida and then moves into colder waters to the north, spinning off eddies.

図4 NOAA衛星で観測された西大西洋の海面温度画像

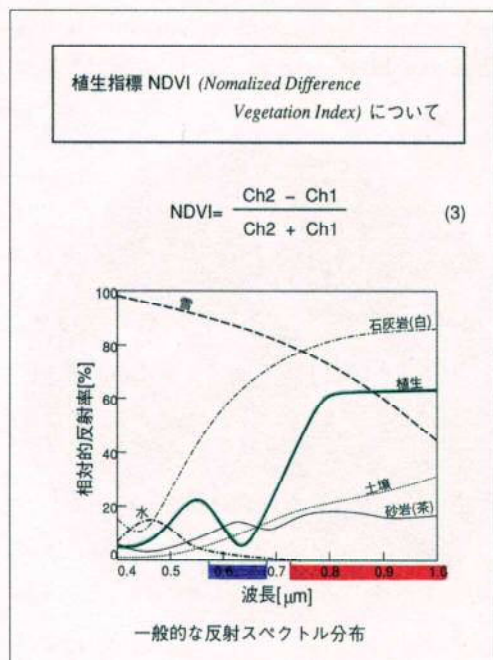


図5 正規化植生指標の原理

(2) 極軌道衛星NOAA

極軌道衛星NOAAシリーズは、1960年のTIROS-1以来の長い歴史がある。1978年のTIROS-N以降のシリーズでは、伝送されるデータもデジタルとなり、利用が一層進んでいる。NOAA衛星には、可視、近赤外、熱赤外のセンサであるAVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) や垂直温度分布測定用のセンサTOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) が搭載されている。当初は、気象観測、海面温度パターンの観測が主な目的であった。例えば、図4は、西大西洋の表面温度画像であり、メキシコ湾流がフロリダからアメリカ東海岸に沿って北上し、渦を作っているのが、良く示されている。NOAA衛星による海面温度パターンの観測は、黒潮等の海流の研究には、不可欠な手段となっている。又、米国のNOAA (大気海洋庁) では、全世界の海面温度分布図を作成している。

その成果として、世界的な異常気象をもたらすと言われているエルニーニョ現象 (1982年および1983年にペルー沖の海水温が異常上昇するエルニーニョ現象が起きた。オーストラリアでは200年来の大旱魃が生じ、逆に南米の西海岸では平常時の降雨の300倍もの雨が降り、氾濫が各地で起きた) に対する関心が高まっているが、NOAA衛星のAVHRRを利用して太平洋の海面温度が測定され、エルニーニョ現象を示すことが出来た。

又、図5の反射スペクトル分布に示される様に、クロロフィルの反射率が近赤外領域で高いことを利用して、AVHRR データの可視チャネル (Ch 1: 0.58 ~ 0.68 μm) とクロロフィルの反射率が高い近赤外チャネル (Ch 2: 0.725 ~ 1.0 μm) を用いた正規化植生指標 (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index = $(Ch 2 - Ch 1) / (Ch 2 + Ch 1)$) を求め、植生の状態を監視する研究が盛んである。これは、NOAA衛星が頻繁に飛来するので、毎日観測することが出来、かつ、衛星直下で1km という分解能ではあるが、広い範囲を観測出来ることにより、植生のモニタリングに適しているためである。

1983年および1984年はアフリカで旱魃が起き、数十万人の餓死者を出したが、アフリカの旱魃と緑の

前線を、NOAA衛星によるNDVIは明確に示しており、これを契機にNOAA衛星データの植生への利用の有効性が認識され、研究が盛んとなった。NOAAでは、機上でデータレコーダに記録されている間引かれたAVHRRデータであるGAC (Global Area Coverage) データを用いて全世界のNDVIデータのデータベースを作っている。又、IGBP (International Geosphere Biosphere Program) に協力するため、EROS Data Centerが中心となって、全世界の毎日の高分解能LAC (Local Area Coverage) データを集めて、処理する“1 km AVHRR Land Project”も92年4月より始まり、東京大学生産技術研究所に在籍していた筆者の研究室もこのプロジェクトに協力して、毎日の午後のデータを提供した。図6は協力したNOAA受信局の分布を、図7はその成果の例を示す。

NOAA衛星データは、長い期間のデータが蓄積されているので、長期間の平均的な状況からのずれを観察することが出来る。図8は、NOAAで作成した1988年から1992年の5年間の平均的NDVIと1993年5月23日の週のデータとを比較したものである。中西部において、洪水の影響を受け、植生指標が平年よりずれていることが分かる。

東京大学生産技術研究所の村井研究室では、衛星により得られた植生指標データを用いて、人間活動による植生に対するイ

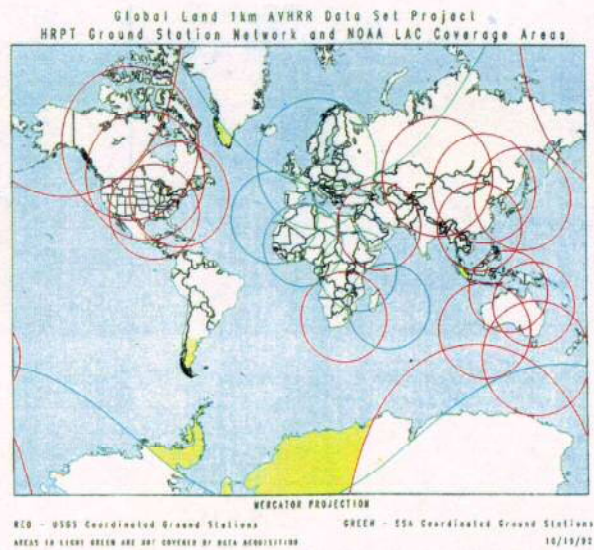


図6 1 km AVHRR Land Projectに協力したNOAA受信局の分布

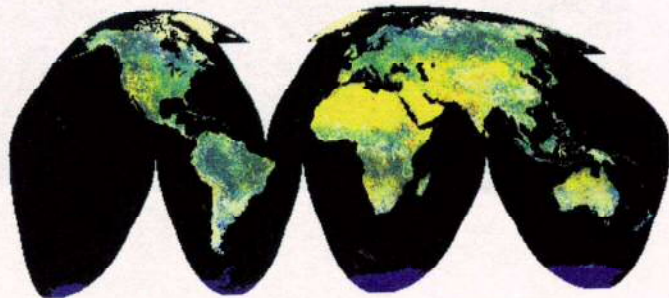


図7 1 km AVHRR Land Projectの成果の例

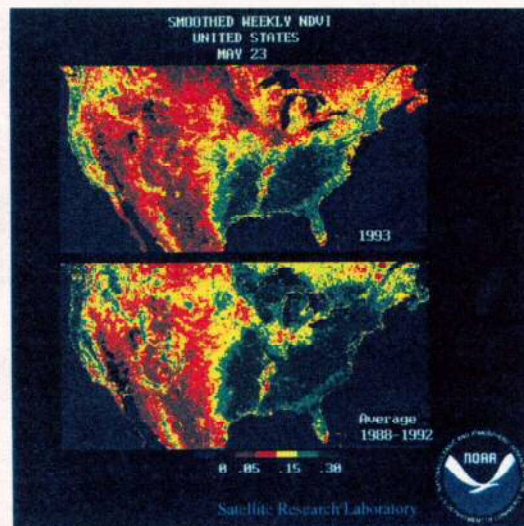


図8 NOAAで作成した平年のNDVIと1993年5月23日のデータとを比較



図9 現存植生、潜在植生とエコクライメートマップ

ンパクトを求める研究を行った。図9にその研究の一端例を紹介する。一番上の現存植生は、衛星観測により求められた各地点の植生指標の年変化のパターンを解析し、熱帯林、森林、草地、半砂漠、砂漠に分類する。中央の潜在植生は、雨量などの気候データ、標高、土壌等のデータから、その土地の潜在植生、即ち、人間の手が入らなかった場合の植生を求めている。一番下のエコクライメートマップは、潜在植生と現存植生との差であって、人間活動による植生の変化を示している。この図は、本来熱帯林が潜在植生であった場所が、どの植生に現在変化しているかを示しており、熱帯林の減少と森林、草地、半砂漠、砂漠へと変化している様子が伺え、熱帯林の破壊、農耕による砂漠化等が如実に分かる。同様に、潜在植生が森林、草地、半砂漠からどの現存植生に変化したかを示すエコクライメートマップも作成されている。

尚、可視、近赤外、赤外気の光学的センサーは、大気のエアロゾ

ル等の変動により影響を受ける。図10は、NOAA衛星で撮影されたPinatubo火山の噴火の様子であるが、その噴煙が日を追うにつれ世界の中緯度地帯に運ばれている様子が、図11に示されている。図12は、アフリカのNDVIへの影響を示しており、噴火以前の1990年に対して、噴火後の1991年はNDVIが下がった様に見え、その翌年には少し改善されている様子が示されている。赤外においても熱赤外で計測する海面温度にも影響が出る。この様な大気効果補正のためのアルゴリズムの開発は、今後の大きな課題として残されている。

又、NOAA衛星と類似の軍事衛星DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) も運用されている。しかし、軍用のためにデータは公開されていなかったが、最近公開される様になった。この衛星の可視チャネルは非常に高感度であり、夜間の光を捉えることが出来る。そのため、この夜間の画像を用いてエネルギー消費や人口密度を求める研究や焼畑農業の分布を求める研究に用いられている。日本付近の画像を見ると韓国と北朝鮮の国境により明暗の対比が明らかである。又、日本海の漁場の集魚灯も明瞭に示されている。SSM/I (Special Sensor Microwave Imager) も搭載されており、海上の風速を求めるのに利用されている。

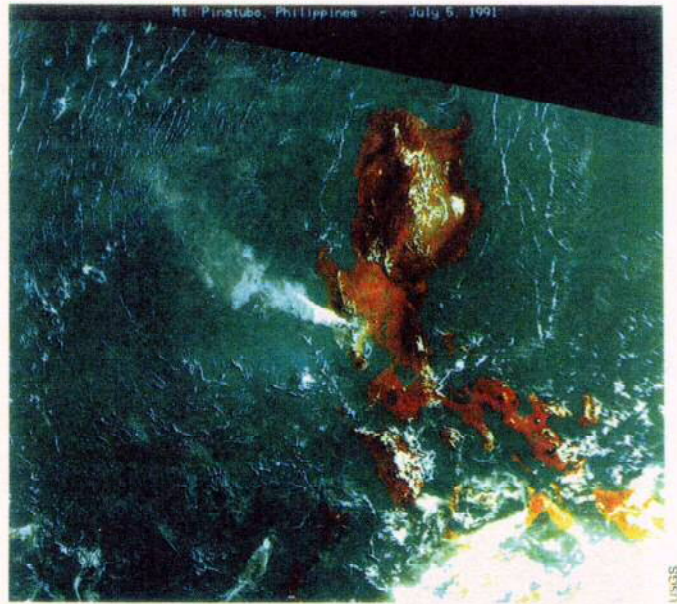


Figure 2. Sulphur dioxide emission from Mt. Pinatubo is captured by a TIROS satellite's Advanced Very High Resolution Radiometer some 540 miles in space three weeks after the eruption. Close monitoring by the satellites tracks the amount and direction of the emission clouds.

図10 NOAA衛星で撮影されたPinatubo火山の噴火

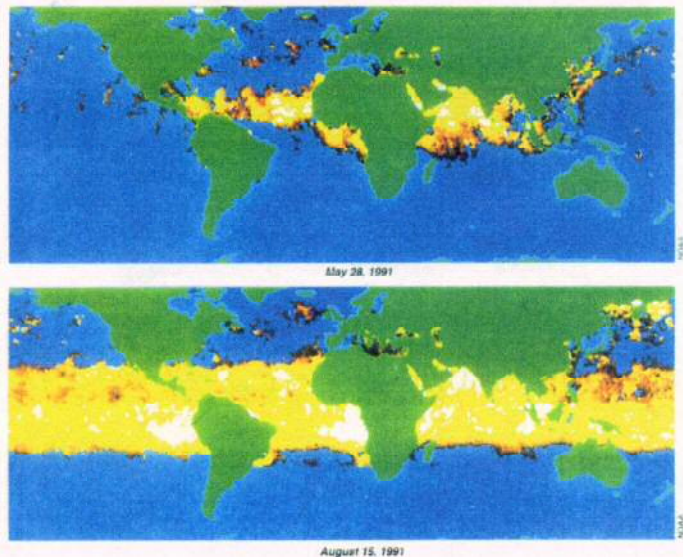


Figure 1. Comparison of the spread of Pinatubo's sulphur dioxide and ash cloud show how rapidly the Earth's atmosphere carried the cloud to global proportions in a very short time.

図11 Pinatubo火山噴火後の噴煙の分布
(上：1991年5月28日，下：1991年8月15日)

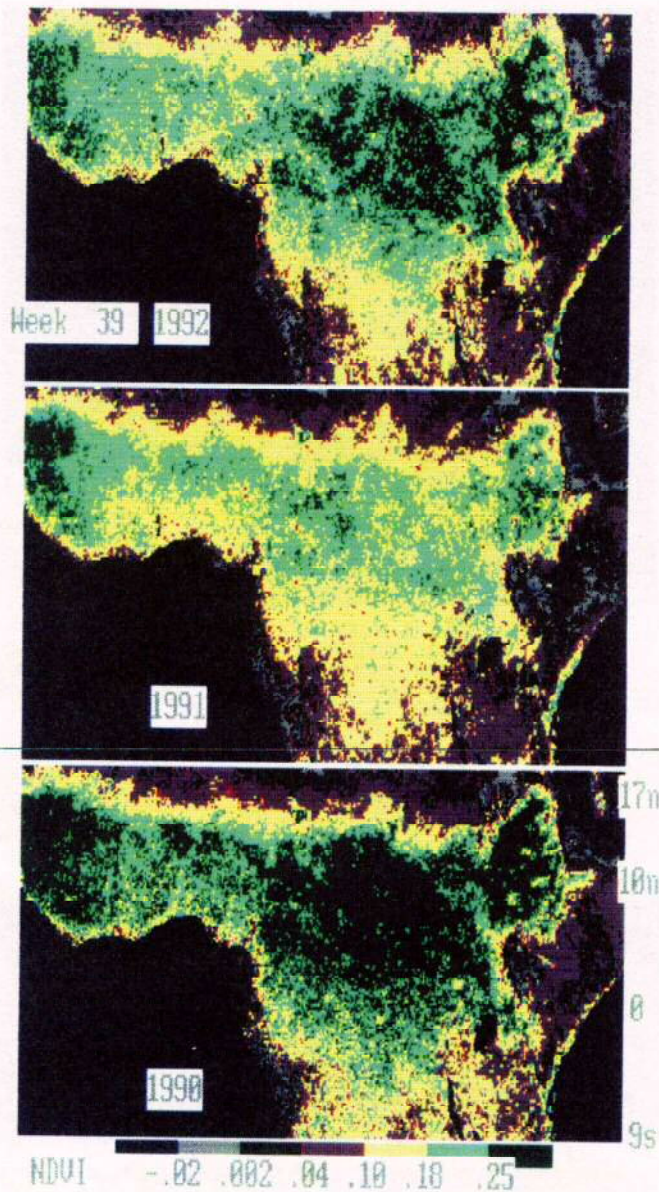


図12 NDVIへの影響

Radar), 高度計, マイクロ波散乱計, マイクロ波放射計が搭載された。SARは, 海面上の波を観測する目的で搭載されたが, デジタル処理を施すことにより, 25mの高分解能画像が得られ, 世界を驚嘆させた。その結果, 海面の観測のみでなく, 地形の情報も良く分かるということが示され, 更に, マイクロ波で観測するために雲の影響を受けない全天候型のセンサであるため, アマゾンの熱帯森林の様に雲に覆われている地域や悪天候の地域では, 光学的センサでは地表の観測が行い難いが, その様な地域の観測が可能である。この成功に刺激されて, SARを搭載する計画が起

(3) 陸域観測用衛星LANDSAT, SPOT

陸域観測用衛星は, 地上の物体の反射率の波長特性によって, 植物, 水, 岩石等の分類を行うために, 多波長, かつ, 高分解能で地上の様子を詳細に観測することを目的とし, 植物の分類や土地利用の解析等に利用しようとするものである。

米国によりLANDSATシリーズが1972年より始められた。地上分解能80mの4バンドのMSS (Multi-spectral Scanner) の出現は, リモートセンシングブームを巻き起こし, 土地利用調査等への利用が世界的に進められた。その後, 更に30m (熱赤外は120m) という高分解能で7バンドを持つ TM (Thematic Mapper) が搭載された。1986年にはフランスが更に高分解能の高分解能可視・近赤外放射計 (HRV: Haute Resolution Visible) を搭載したSPOTを打上げ, 地上の現象を詳細に知ることが可能となった。日本も地球資源衛星 (JERS-1: ふよう) を打上げている。

(4) SEASAT

1978年に海洋衛星 SEASAT が打上げられ, 合成開口レーダ SAR (Synthetic Aperture

こり、ヨーロッパ (EERS-1) と日本 (JERS-1) が1992年、93年と相次いで打上げられた。図13は、JERS-1が初めて観測した画像で、富士山付近の地形が良く捉えられている。アンテナ展開に手間取ったため、小田学長に開会式での特別講演をお願いしたりリモートセンシングの国際会議 (IGARSS '93) のポスターに辛うじて間に合った。図14は、ヨーロッパのERS-1が初めて観測した画像で、海洋の波の様子が良く捉えられている。カナダはマイクロ波を用いたSARが全天候型であるので、北極域の海水や海洋の調査を目的としたRADARSATを打上げた。又、SEASATが打ち上げられた頃は、SAR画像のデジタル処理には膨大な計算時間を要していたので、「科学技術用高速計算機」の大型プロジェクトの目的にも、この処理の高速化が謳われていたが、その間の計算機の進歩は目覚ましく、メモリもふんだんに使え、速度の向上も著しく、現在では、PCでも処理が可能となっている。

又、地球科学の面では、SEASATには高精度の高度計が搭載され、海面の起伏を測定した。海面には重力によって起伏があり、海溝の上の海面は重力が小さいため海面が低くなり、逆に水深の浅い海嶺部では重力が大きく高くなる。測定された海面の起伏パターンは、全世界の海底の測深図と良く一致することを示した。この計測は、TOPEX/POSEIDONによって引き継がれている。更に、マイクロ波散乱計により、海上風の方向と大きさを測定した。海上風は波および海流を引き起こす主たる外力であり、大気と海洋の間の熱交換に大きな影響を与える。グローバルなスケールでは海上風の分布はほとんど海流のパターンと同じであり、熱帯で得られる太陽熱が極地に運ばれバランスしようとする。このような太平洋上の海上風 (風向、風速) を観測し

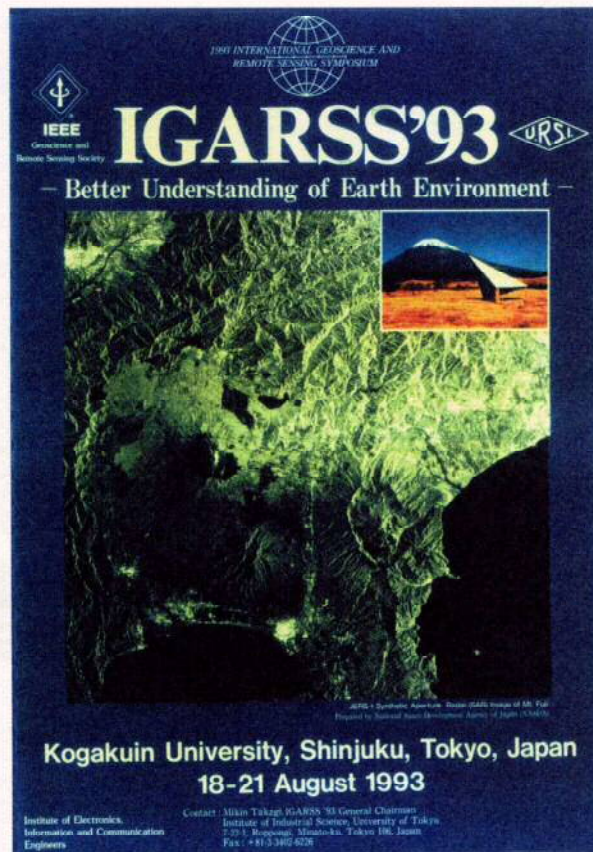


図13 JERS-1が初めて観測した画像

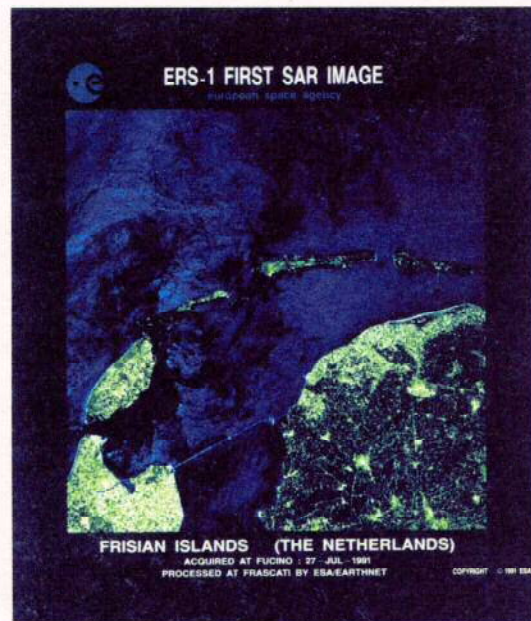


図14 ヨーロッパのERS-1が初めて観測した画像

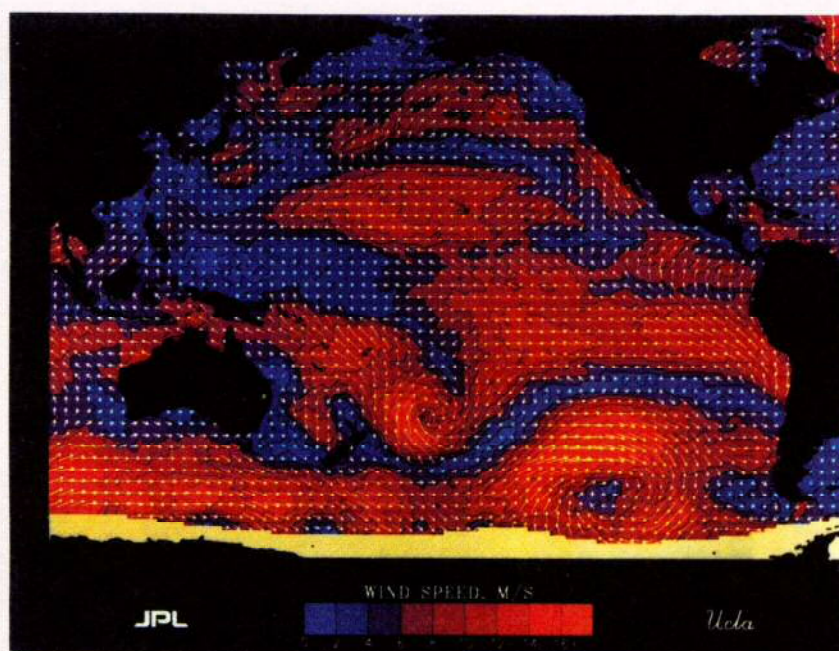


Fig. 14c: Mean wind field over the Pacific derived from the Seasat scatterometer. The mean field corresponds to the period of September 6-8, 1978 (courtesy of P. Woiceshyn, JPL).

図 15 太平洋上の海上風

た。(図15) この観測は、日本が打上げたADEOS 衛星に搭載されたNSCATでも引継がれ、その他の衛星にも搭載されている。

(5) NIMBUS-7

NIMBUS-7は、CZCS (Coastal Zone Color Scanner) の他、赤外や紫外のスペクトロメータ、マイクロ波スペクトロメータ等々の多数の実験用観測機器を搭載した衛星で1978年に打上げられた。

CZCSは、海中のプランクトンや懸濁物の観測を目的とした多波長を用いる海色センサを初めて搭載した。海中から衛星に届く微弱な信号を捕らえるためエアロゾルの影響等を取除く高度な放射量補正処理を必要とするが、海洋における二酸化炭素の問題や漁業に関連する海洋のバイオマス（植物プランクトン）の研究を行うには不可欠である。

その後、海色センサーを搭載された衛星が待ち望まれていたが、日本のADEOS衛星のOCTS (Ocean Color Temperature Scanner), SeaStar衛星のSeaWiFSセンサとして搭載され、SeaStar衛星は、現在も観測を続けている。又、中国（台湾）も海色センサーを搭載したROCSATを、インドもIRS-P4 (OCEANSAT-1) を運用中である。

又、NIMBUS-7のTOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) によるオゾンの観測により、南極にオゾンホールがあるということが画像として明瞭に示され、これを契機にオゾンの問題が騒がしくなり、フロン規制が始まることとなった。以来、衛星によるオゾンの観測は、重要観測項目となり、ADEOSにもTOMSが、ERS-2にもGOME (Global Ozone Monitoring Experiment) が搭載された。

NIMBUS-7は、実験用衛星であるが、地球環境問題に大きな話題を投げ掛けた。

(6) TRMM

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 衛星は、日本が打上げて日米の観測器を搭載している。TRMM衛星は、熱帯地方の降雨を観測するために、赤道に対して 30° という低い傾斜角、350kmと低高度の軌道に設定され、降雨レーダ (PR: Precipitation Radar)、可視赤外観測装置 (VIRS: Visible Infrared Radiometer)、TRMMマイクロ波観測装置 (TMI: TRMM Microwave Imager)、雲及び地球放射エネルギー観測装置 (CERES: Cloud and Earth Radiant Energy Sensor)、雷観測装置 (LIS: Lightning Imaging Sensor) の5つの機器が搭載されている。降雨レーダ (PR) は、日本で開発されたこの衛星の中心機器であり、アクティブフェーズドアレイ方式で、観測幅は215km、観測範囲は地表から高度15km、距離分解能は250m、水平分解能は4.3km (直下)、検出可能降雨強度は0.5mm/hという優れた特性を有しており、降雨の3次元構造を解明出来る。目下、観測が進められており、降雨の機構の解明、エルニーニョ現象の解明に貢献することが期待されている。

4. 2000年代の地球環境観測衛星

衛星による観測は、増大する地球環境への脅威から地球を守ろうというMission to Planet Earthに、重要な手段を提供する。米国、欧州、日本でPOP (Polar Orbital Platform: 極軌道プラットフォーム) にEOS (Earth Observing System) を搭載する計画が進められていたが、景気の後退、NASAの予算削減等で当初の計画より遅れている。しかし、昨年12月に米国のEOS AM-1衛星として位置付けられているTerra衛星 (<http://terra.nasa.gov/>) が打ち上げられた。

地球環境の観測には継続性が重要である。継続性の観点からは、静止気象衛星はその必要上から機能を向上しつつ継続するものと思われる。又、NOAA衛星のシリーズも2000年代は継続することが決まっている。

2000年代前半の重要な衛星は、Terra衛星とその姉妹衛星EOS PM-1として12月に打上げられる予定のAqua衛星 (<http://eos-pm.gsfc.nasa.gov/>) であろう。いずれも6年の寿命を想定しており、EOS PMは米国が引続いて運用し、EOS AMのTerraの後継機については、未定でありヨーロッパが引受けるという説も聞いたことがある。

Terra衛星及びAqua衛星は、地球環境を大気、海洋、陸域と広範囲に観測する万能のセンサMODISを搭載し、しかも、NOAA衛星の伝統を引継ぎ、MODISのデータは、Direct Broadcastされ、受信局を用意すれば、誰でも自由に受信出来る点に特徴があり、学術的な研究には最適なものである。

Terra

Terra衛星には、センサとして、Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)、Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES)、Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer (MISR)、Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS)、Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT) が搭載されており、表1の様に大気、陸域、海洋、雪氷、太陽輻射と地球上のあらゆる環境を搭載されている各種の機器を用いて解明する。

表1 Terra (EOS-AM) の各分野の観測項目と機器

Discipline	Measurement	EOS-AM Instruments
ATMOSPHERE	Cloud Properties Radiative Energy Fluxes Precipitation Tropospheric Chemistry Stratospheric Chemistry Aerosol Properties Atmospheric Temperature Atmospheric Humidity Lightning	MODIS, MISR, ASTER CERES, MODIS, MISR, MOPITT MISR, MODIS MODIS MODIS,
LAND	Land Cover and Land Use Change Vegetation Dynamics Surface Temperature Fire Occurrence Volcanic Effects Surface Wetness	MODIS, MISR, ASTER MODIS, MISR, ASTER MODIS, ASTER MODIS, ASTER MODIS, MISR, ASTER
OCEAN	Surface Temperature Phytoplankton & Dissolved Organic Matter Surface Wind Fields Ocean Surface Topography	MODIS MODIS, MISR
CRYOSPHERE	Land Ice Change Sea Ice Snow Cover	ASTER MODIS, ASTER MODIS, ASTER
SOLAR ADIATION	Total Solar Irradiance Ultraviolet Spectral Irradiance	

ASTERは、日本が開発したVNIR (可視, 近赤外), SWIR (短波長赤外), TIR (熱赤外)の3機器で構成され、高分解能の観測を行う。VNIRは、デジタル標高地図を作成するために、後方と直下を見る2系統でステレオ視を行うことが可能である。0.5-0.9 μm の可視, 近赤外領域の3チャンネル, 分解能15m, 走査幅60kmのセンサで、噴火や災害時に観測頻度を上げるために進行方向に対して $\pm 24^\circ$ 振ることが可能である。SWIRは、資源探査のために岩石の波長特性観測用の1.6-2.5 μm の短波長赤外領域の6チャンネル, 分解能30m, 走査幅60kmのセンサで、直下に対して $\pm 8.54^\circ$ 振ることが可能である。TIRは、8-12 μm の熱赤外領域の5チャンネル, 分解能90m, 走査幅60kmのセンサで、直下に対して $\pm 8.54^\circ$ 振ることが可能である。

CERESは、地球の全放射収支と放射フラックスにおける雲の役割を観測するために、反射される太陽光測定用の短波長0.3-5.0 μm , 地球の熱放射測定用の長波長8-12 μm , 全放射測定用の0.3-200 μm の領域の3センサで構成され、分解能は20kmである。

MISRは、地球の気候を理解するために太陽光がどの方向に散乱されるかを観測する新しいセンサで、9台のカメラが446, 558, 672, 866 nmの4波長で直下、前方及び後方の $26.1^\circ, 45.6^\circ, 60.0^\circ, 70.5^\circ$ に向けられ、分解能は直下で250 mであり、雲、エアロゾル、地表の種類を識別する。

MODIS (<http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/MODIS/MODIS.html>) は、Terraの中心的観測機器であり、現地時間の午前10時30分（陸域の植生を観測するのに適している。そのためTerraの名が付けられたと思われる。）の太陽同期軌道で2330kmの走査幅で表2に示された36バンド（チャンネル）

表 2 MODISの仕様

Primary Use	Band	Bandwidth(1)	Spectral radiance(2)	Required SNR(3)
Land/Cloud Boundaries	1	620-670	21.8	128
	2	841-876	24.7	201
Land/Cloud Properties	3	459-479	1.0696	243
	4	545-565	1.0130	228
	5	1230-1250	0.8420	74
	6	1628-1652	1.0338	275
	7	2105-2155	0.3249	110
Ocean Color/ Phytoplankton/ Biogeochemistry	8	405-420	0.3728	880
	9	438-448	0.2593	838
	10	483-493	0.1913	802
	11	526-536	0.1580	754
	12	546-556	0.1243	750
	13	662-672	0.0750	910
	14	673-683	0.0748	1087
	15	743-753	0.0741	586
Atmospheric Vapor Water	16	862-877	0.0599	516
	17	890-920	0.7490	167
	18	931-941	1.1422	57
Cirrus Clouds	19	915-965	0.8447	250
	26	1.360-1.390	0.8944	1504
Primary Use	Band	Bandwidth(1)	Spectral radiance(2)	Required NE Δ T(K)(4)
Cloud Surface/ Temperature	20	3.660-3.840	333	0.05
	21	3.929-3.989	429	2.00
	22	3.929-3.989	329	0.07
	23	4.020-4.080	329	0.07
Atmospheric Temperature Water Vapor	24	4.433-4.498	318	0.25
	25	4.482-4.549	314	0.25
	27	6.535-6.895	323	0.25
	28	7.175-7.475	320	0.25
	29	8.400-8.700	330	0.05
Ozone	30	9.580-9.880	364	0.25
Surface/ Cloud Temperature Cloud Top Altitude	31	10.780-11.280	399	0.05
	32	11.770-12.270	391	0.05
	33	13.185-13.485	335	0.25
	34	13.485-13.785	341	0.25
	35	13.785-14.085	339	0.25
	36	14.085-14.385	371	0.35

* Saturation for bands 1-19 & 26 are given in reflectance values; bands 20-25 & 27-36 are given in kelvins.

1 Bands 1 to 19, nm; Bands 20-36, μ m

2 Spectral Radiance values are (W/m² - μ m-sr)

3 SNR = Signal-to-noise ratio

4 NE Δ T = Noise-equivalent temperature difference

Performance goal is 30-40% better than required

で観測を行う。空間分解能は、直下点でバンド1-2が250m, バンド3-7が500m, バンド8-36が1000mで (AVHRRは1km), データは12ビット (AVHRRは10ビット) で量子化される。NOAA衛星のAVHRRの伝統を受け継ぎ改良された。

観測対象は、雲の性質、放射エネルギーフラックス、エアロゾルの性質、土地被覆と土地利用の変化、植生のダイナミックス、地表面温度、火事、噴火、海面温度、海色、雪面被覆、大気温度と湿度、海水等多岐に涉っている。表2に示されている様に、可視、近赤外領域の20のバンドで陸域、雲、エアロゾル、海色、大気中の水蒸気、巻雲を観測し、赤外領域の16のバンドで地表や雲の温度、大気の大気温度、水蒸気、オゾンを観測する。Atmosphere, Calibration, Land, Ocean の4つのMODIS Science Teamが作られている。

MOPITT は、低層大気と陸域、海洋の生物圏との相互作用に関する知見を得ることを目的としている。メタンと一酸化炭素を検出する2.3 (CH₄), 2.4 (CO), 4.7(CO) μ mのセンサで、22 kmの分解能で640 kmを走査する。

Aqua

EOS PM-1として位置付けられているAqua衛星も12月に打上げが予定されている。この衛星は、現地時間の午後1時30分に飛来する太陽同期極軌道に設定されている。(MODISによる海色の観測には、太陽の影響を受けにくいという面で、Terraよりも適している。そのためAquaの名が付けられたと思われる。) その目的は、大気、海洋、地表面に関連する地球の相関過程とそれらの地球システム変動への関係を研究することであり、データセットとして、大気温度と湿度のプロファイル、雲、降雨、放射バランス、雪氷、海面水温、海洋の生産性、土壌水分が作成され、数値予報の精度向上にも貢献する。

センサとしては、Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) (上向きの放射を0.4–1.7, 3.74–15.4 μ mの範囲を2378チャンネルで観測し、大気温度と湿度、表面温度、雲の性質、放射エネルギーフラックスを観測する。), Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) (50–89GHzを15チャンネルで観測する受動型走査型マイクロ波放射計で、大気の大気温度と湿度を観測する), AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-EO) (6.9–89GHzを6周波数で12チャンネル観測する日本製の受動型前方視走査型マイクロ波放射計で、雲の性質、放射エネルギーフラックス、降雨、地表面湿度、海水、雪面、海面温度、海上風を観測する), CERES (Terraに搭載されているものと同仕様), HSB (Humidity Sounder for Brazil) (150–183GHz帯の5チャンネルの受動型走査型マイクロ波放射計で、大気の大気湿度を観測する。), MODIS (Terraに搭載されているものと同仕様) が搭載される。

データ処理

Terra衛星のデータは、Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS) 経由でNew Mexico州のWhite Sandsの地上局で150 Mbpsで受信され記録される。そのデータは45 Mbpsの回線でGoddard Space Flight Centerに送られ、Level 0 (表3に処理のレベルを示す。) の処理が施され、ASTERデータを除き、機器を担当しているDistributed Active Archive Center (DAAC) (表4) に送られ、サイエンスチームによって開発されたアルゴリズムで高次の処理が行われる。

Level 0のASTERデータは、東京のASTER Ground Data System (GDS)に送られ、Level 1のデータがEROS Data Centerに送られる。米国におけるTerra衛星の各観測機器の処理体制は、上に

表 3 処理レベル

Level 0	Reconstructed, unprocessed data at full resolution; all communications artifacts have been removed
Level 1	Level 0 data that has been time-referenced and annotated with ancillary information, including radiometric and geometric calibration coefficients, and geolocation information
Level 2	Derived geophysical variables at the same resolution and location as the Level 1 data
Level 3	Variables mapped on uniform space-time grids, usually with some completeness and consistency
Level 4	Model output or results from analyses of lower level data

表 4 Distributed Active Archive Center

DAAC	Discipline	Instrument
EROS Data Center	Land processes data	ASTER, MODIS
Goddard Space Flight Center	Upper atmosphere chemistry, atmospheric dynamics, global biosphere, hydrology, and geophysics	MODIS
Langley Research Center National Snow and Ice Data Center	Radiation budget, clouds, aerosols, surface radiation, land processes, and tropospheric chemistry	CERES, MISR, MOPITT
	Snow and ice, cryosphere, and climate	MODIS

述べた如くであり、利用者は各DAACからデータの提供を受けて利用する。

しかし、観測機器の中でMODISは、NOAA衛星と同様にDirect Broadcastも行うので、その特性を活かしてDAACの様な重い組織ではなく、Direct Broadcast受信局を拠点として幾つか配置し、地域的な研究や対象を特化した研究を推進するネットワークを構築しようとしている。拠点としては、Goddard Space Flight Center, University of Wisconsin, Oregon State University, University of South Florida, University of Hawaiiが参加し、データのアーカイブと処理を行う。現在、Goddard Space Flight CenterとUniversity of HawaiiがMODISのデータを受信しており、近々、他の局も稼働する予定である。又、12月に打上げられるAqua衛星のMODISデータも同様にDirect Broadcastされるので、Terra衛星及びAqua衛星が組となって、地球環境を観測し、地球環境変動の理解が進むことが期待される。

各拠点におけるLevel 0からLevel 4 への処理のソフトウェアはNASAから供給されることになっているが、遅れている。最近、Level 0がGoddard Space Flight Centerから提供され、University of Wisconsinが担当しているLevel 1も試験的に提供された。幾何学的補正のためのGCPデータを含むので、2GBと膨大なものである。利用のために必要なLevel 2以上のソフトウェアは各Science Teamが担当しているが遅れている。

5. おわりに

ここでは、長期にわたる地球のグローバルな継続的観測が行えることにより地球環境を理解する上で不可欠な衛星による地球環境のモニタリングの重要性を紹介した。地球環境の学術的な研究を推進するためには、各種の衛星を活用する必要があるが、特に、重要なのは常時データが入

手出来，かつ，継続して運用されるDirect Broadcast型の衛星である。従来から，GMSとNOAA衛星データの受信・処理・配布を行って来たが，2000年代前半にはTerra衛星とAqua衛星のMODISのDirect Broadcastが，大気，海洋，陸域に利用できるデータを提供するので，この利用が学術的研究の推進に重要と考えられる。

我国においても，MODISデータの利用を推進するための体制作りが必要である。特に，36チャンネルで観測されたデータから現象を説明するパラメータに如何にして算出するかというアルゴリズム開発が不可欠である。米国では，各分野毎にscience teamを構成してアルゴリズム開発を行っているが，先方のアルゴリズムを貰って使うだけでなく，独自のものを開発して比較することが望ましい。又，Direct Broadcast受信拠点を作り，日本周辺の研究を推進しないと地球環境に関する研究に大きな遅れをとることとなる。更に，アジア域のDirect Broadcast受信拠点と連携して，ネットワーク作りを推進したい。

付記：

衛星からの情報を駆使した地球環境の解明のための学術的研究を一段と飛躍させるためには，研究のインフラストラクチャ（技術的基盤）の整備，即ち，

- ・衛星データの受信，処理，配布，アーカイブ体制の整備
- ・衛星データを利用するためのデータベースの整備
- ・処理アルゴリズム，ソフトウェアの整備と流通
- ・処理環境の充実
- ・ネットワーク利用の推進

が不可欠であることを，特定研究「宇宙からのリモートセンシングデータの高次利用に関する研究」（昭和60年度－63年度），重点領域研究「衛星による地球環境の解明」（平成元年度－3年度）を通して痛感して来た。平成5年度科学研究費補助金総合研究（B）「地球環境衛星データシステムの構築とその利用」を受け，学術情報ネットワークに基づいた分散型の衛星データセンターが提唱した。平成8年度－10年度の重点領域研究「衛星計測による水・熱エネルギーフローの解明」においてもその方向で努力が続けられた。最近のプロジェクトを添付する。